第 37 卷第 4 期
2017 年 2 月
生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.4
Feb.,2017

DOI: 10.5846/stxb201604270801

秦莉,袁玉江,喻树龙,范子昂,尚华明,陈峰,张同文,张瑞波.新疆赛里木湖流域过去 373 年降水变化的树轮记录.生态学报,2017,37(4):1084-1092.

Qin L, Yuan Y J, Yu S L, Fan Z A, Shang H M, Chen F, Zhang T W, Zhang R B.Tree-ring-based precipitation variability over the past 373 years in the Sayram Lake Basin, Tianshan Mountians.Acta Ecologica Sinica,2017,37(4):1084-1092.

新疆赛里木湖流域过去 373 年降水变化的树轮记录

秦　莉*,袁玉江,喻树龙,范子昂,尚华明,陈　峰,张同文,张瑞波

中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所;中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室;新疆树木年轮生态实验室, 乌鲁木齐　830002

摘要:利用采自天山西部赛里木湖流域的树木年轮标准化宽度年表,重建了赛里木湖流域过去 373 年上年 8 月到当年 7 月的降水变化,重建序列的解释方差达到 39.8%,多方验证表明,重建结果是稳定可靠的。分析历史降水变化特征表明,赛里木湖流域过去 373 年的降水经历了 6 干 7 湿的阶段变化,其中,持续最长的干旱阶段为 1762—1791 年,而最为干旱的阶段为 1841—1865 年;持续最长的湿润阶段为 1794—1840 年,而最为湿润的阶段为 1734—1761 年间;赛里木流域历史降水存在 3 个极端湿润年(1749,1876 和 1924 年)和 4 个极端干旱年(1714,1775,1847 和 1917 年),1910 年代为最干旱的十年;降水变化存在 11—12a、3.0a、2.5a、2.1a 和 2.0a 的变化准周期;赛里木湖流域过去 373 年的降水的阶段变化、周期变化和极端降水年份均与天山北坡中西部和中亚天山山区降水变化具有很好的一致性,本研究的降水重建序列能较好的代表天山北坡中西部和中亚大部分区域历史降水变化。

关键词:赛里木湖; 树木年轮; 降水;气候变化;天山

Tree-ring-based precipitation variability over the past 373 years in the Sayram Lake Basin, Tianshan Mountians

QIN Li*, YUAN Yujiang, YU Shulong, FAN Zi′ang, SHANG Huaming, CHEN Feng, ZHANG Tongwen, ZHANG Ruibo

Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration; Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration; Key Laboratory of Tree-ring Ecology of Xinjiang Uigur Autonomous Region, Urumqi 830002, *China*

Abstract: Tianshan Mountains are an important area for water source; they are dominated by westerly winds and play an important role in global climate change research. It is vital to understand past precipitation changes and explore their mechanism for the current sustainable utilization of regional water resources. Since the Tianshan Mountains are located in an arid inland area, tree rings are sensitive to climatic moisture status and are a good proxy of past precipitation. In this study, we developed a tree-ring-width chronology of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana Fisch.* et Mey) in the Sayram Lake Basin of the Tianshan Mountians. Climate-growth response results showed that the precipitation from the previous August to current July was the principal limiting factor of radial growth. We also obtained a 373 a reconstruction of August-July precipitation in the Sayram Lake Basin. The reconstruction explained 39.8% of the variance in precipitation records during the 1960—2009 calibration periods. Additionally, the precipitation over the past 373 a in the Sayram Lake Basin has experienced six drier and seven wetter periods, and the extreme drought years were 1714, 1775, 1847 and 1917; 1917 was the driest year

基金项目:中国沙漠气象科学研究基金资助项目(Sqj2015010); 国家自然科学基金资助项目(41675152,41405139); 新疆维吾尔自治区重点实验室开放基金资助项目(2014KL017,2015KL017);中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目(IDM2016006)

收稿日期:2016-04-27;　　**修订日期**:2016-09-01

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: Qinhappy@ sina.com

in the past 373 year, and the driest decade was the 1910s. Meanwhile, there was large power in the 11—12 a, 3.0 a, 2.5 a, 2.1 a and 2.0 a periods. We suggest that the precipitation variability could be associated with large-scale oscillations in the climate system. The reconstruction illuminates precipitation variability and changes in a region where the climate history over the past several centuries is poorly understood.

Key Words: Sayram Lake Basin; Tree-rings; Precipitation; Climate change; Tianshan Mountians

IPCC 第五次评估报告显示全球变暖成为不争的事实,但区域气候变化仍然存在很大的不确定性,有待进一步研究[1]。全球变暖导致不同区域的降水和水文循环产生不同的变化[2],而 Huang 等[3]认为气候变暖加速干旱区的扩展。《气候变化国家评估报告》指出,目前气候变化对于干旱和洪涝等极端气候事件的研究尚处于起步阶段,无论是研究方法和研究内容都比较薄弱。深入研究分析气候变化背景下干旱演变的态势,进行合理的干旱预警与流域干旱致灾效应分析,对科学用水、水资源合理调配以及流域的可持续发展具有重要意义。世界气象组织(WMO)和 IPCC 联合发布的报告指出,未来某些内陆干旱区的持续干旱和高温等极端时间很可能更加频繁地发生[4]。因此,理解区域历史干湿变化并提取历史主要干旱事件对区域社会经济发展,水资源管理和防灾减灾具有重要意义。

天山山系呈东西走向,横贯在中国、吉尔吉斯斯坦和哈萨克斯坦境内,全长 2400 多 km,是亚洲最大山系之一,总面积约 100 万 km^2,天山被誉为中亚干旱区的“湿岛”,气候独特,生态环境脆弱,这决定了该区域在全球变化研究中的特殊地位,理解该地区气候变化机制对区域水资源可持续利用至关重要[5]。Shi 等[6]研究表明,中国西北部从 19 世纪小冰期结束以来 100a 左右处于波动性变暖变干过程中,1987 年起新疆以天山西部为主地区气候出现了由“暖干”向“暖湿”转型现象。赛里木湖位于西天山中段、准噶尔盆地西南隅,处于我国西风带天气系统的上游地区,对其过去气候变化事实的揭示有利于我国西部地区尤其是新疆的气候诊断、气候预估、防灾减灾和水资源利用和管理等决策和服务工作的顺利实施,更有利于丝绸之路经济带和天山北坡经济带的建设。而赛里木湖流域气象站稀少,且建于 20 世纪 60 年代以后,因此,认识长期赛里木湖流域长期干湿变化及其在年代际-百年尺度上的规律需借助于代用资料。在众多的代用资料中,树木年轮以其分辨率高、连续性好、样本分布广泛和定年准确等特点在古气候重建以及古环境演变等方面得到较好应用[7-12]。近几十年来,研究人员在天山山区做了大量的树轮气候研究工作,研究表明,在天山山区,树木年轮径向生长对降水响应要远远好于气温,利用树轮宽度已重建了中国天山山区多条降水序列[13-25]。但到目前为止,赛里木湖流域历史气候序列还未曾建立。本研究利用采自中国天山西部赛里木湖流域的雪岭云杉树轮样本,结合气象观测资料重建了赛里木湖流域过去 373 年的干湿变化,并探讨历史干湿变化特征及可能的影响因素。本研究完善了中亚天山树轮气候资料网,为进一步大范围气候重建及解释中亚干旱区历史气候变化的影响机制奠定基础。

1　资料和方法

1.1　研究区概况与树轮资料获取

赛里木湖位于我国西北干旱区,西与哈萨克斯坦隔山相望,地处西天山北坡中段、准噶尔盆地西南隅,湖泊集水面积为 1408 km^2,湖面海拔 2072m。赛里木湖流域受西风带影响,湖区常年盛行西风或偏西风,经西风环流带来的水汽是该区降水的主要来源[26]。雪岭云杉(*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey)大量分布于赛里木湖四周亚高山带(2150—2600m)的阴坡和河谷底部,构成了环赛里木湖的原始暗针叶纯林[27]。树轮样本于 2010 年采自赛里木湖流域北部海西沟(HXG,81°11′E,44°43′N)(图 1),采样点位于森林中下线的阴坡,海拔高度为 2240—2280 m,坡向为北坡,坡度为 20°左右,共采集了 30 棵树 60 个样芯。

1.2　气象资料

气象数据选择距采样点最近的温泉县气象站(81°01′ E,44°58′ N,海拔 1353.9 m,1959—2010 年)的逐月

降水、温度(月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温)资料,资料来自中国气象数据网(http://cdc.cma.gov.cn/),该地区属于温带大陆性气候,主要气候特点雨热同期、冬冷夏热、昼夜温差大、日照时间长、降雨量小、蒸发量大,年平均气温为 3.9 ℃,年平均降水量 228 mm[28](图 2)。将重建序列与英国 East Anglia 大学的 Climatic Research Unit(简称 CRU) 1901 年 1 月到 2014 年 12 月的高分辨率全球逐月格点数据集(CRU TS 3.23)进行空间代表性对比,本研究选用较为可靠的并与重建序列交叉的 1960—2009 年 CRU 降水数据分析重建序列的代表性。

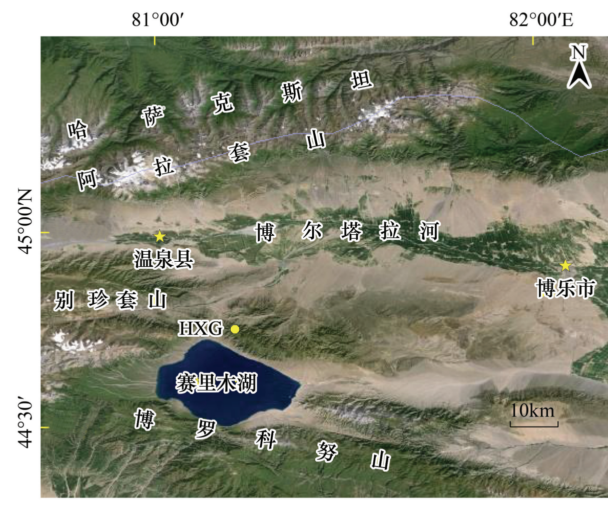


图 1 树轮采样点示意图

Fig.1 Location of tree-ring sampling site

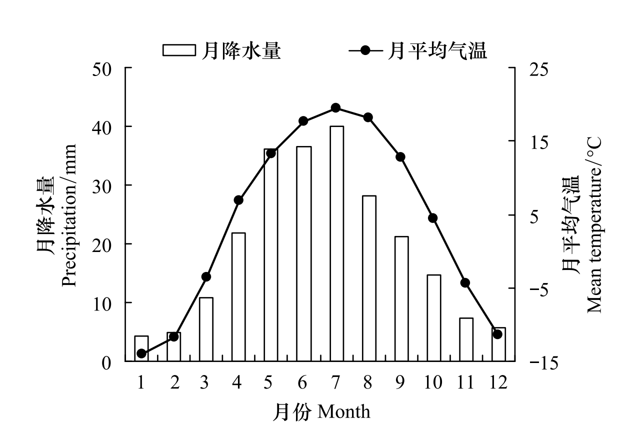


图 2 温泉气象站建站以来的平均气温和降水量的月变化(1959—2010)

Fig.2 Mean monthly temperature and precipitation of Wenquan meteorological station (1959—2010)

1.3 研究方法

树轮样本在中国气象局树木年轮理化研究重点实验室进行晾干、固定、打磨、定年,用轮宽测量仪 Velmex (Velmex Inc., Bloomfield, NY, USA,精度为 0.001mm)和 MeasureJ2X 程序完成树轮宽度测量,剔除在采样过程中一个断裂缺轮样芯,利用国际年轮库的 COFECHA 交叉定年质量控制程序进行交叉定年检验,确保每轮的生长年代[29]。利用 ARSTAN[10]程序进行去趋势,样条函数法无需假定年轮样本生长趋势的变化形式,直接采用连续光滑插值方法对具有持续性生长以及种间竞争产生的非同步扰动的树木进行生长趋势拟合,因此适用于湿润地区[30]。本研究区虽然地处干旱半干旱地区,但是该地区雪岭云杉生境较好,生长较为茂密,存在树间竞争。因此选用基于比率和算数平均法得到宽度指数,进一步采用样条函数步长为 110a 以保留更多的低频变化趋势, 降低因年龄生长速率不同而带来的影响,同时使用 2/3 序列长度的样条函数进一步稳定年表的方差,最终研制出树轮宽度标准化年表。为使重建的气候序列可靠准确,本研究所选取的可靠年表长度起始点采用 EPS 大于 0.85 的样本量[30],可靠年表长达 374a(1637—2010)(图 3)。

采用 DendroClim2002 相关分析和响应分析解释树木径向生长对气候的响应[31];采用逐步回归建立拟合方程重建降水序列。由于温泉气象站资料较短,因此本研究采用国际年轮研究中常用的“逐一剔除法”进行交叉检验,从误差缩减值 *RE*、相关系数 r、一阶差相关系数 r_d、符号检验值 z、一阶差符号检验值 z_d 和乘积平均数 t 等几个方面对重建方程进行交叉检验。如果这些检验统计量中的误差缩减值或其它某几个能通过检验,则说明,该重建方程是稳定的,由其重建出的降水和温度是可靠的。采用多窗谱分析提取时间序列的变化准周期[30]。另外,本研究将所有重建序列进行 30 年低通滤波以提取其低频变化,对比分析天山山区阶段变化的一致性规律。

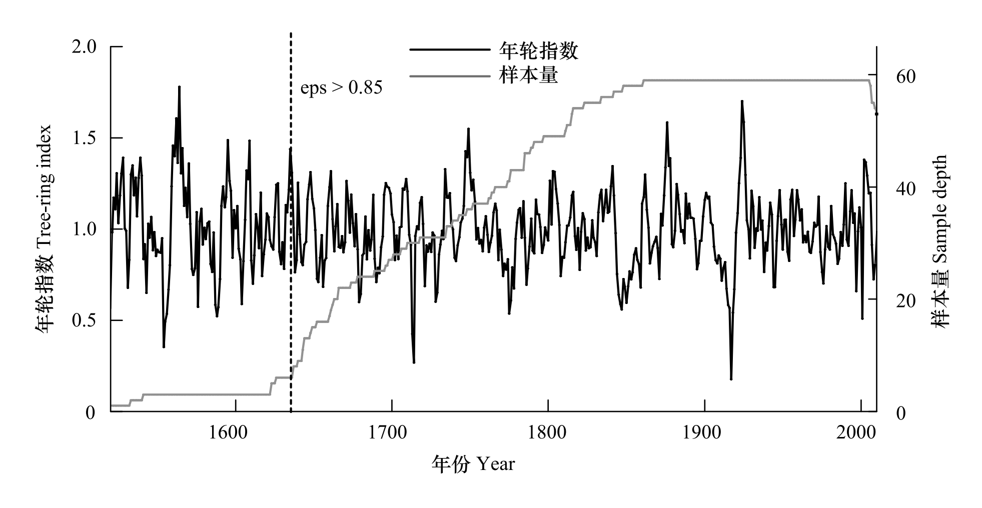


图 3　树轮宽度标准化年表和样本量

Fig.3　Tree-ring width standardized chronology and the amount of samples

2　结果与讨论

2.1　赛里木湖流域历史降水重建与检验

本研究使用的海西沟(HXG)树轮宽度标准化年表平均敏感度为 0.152,标准差 0.216,所有样本的相关系数为 0.397,年表序列信噪比是 32.28, 样本量的总体代表性(97.0%)比较高,缺轮百分率为 0.316%,说明树轮宽度标准化年表序列可能包含较多的气候信息。

前期关于赛里木湖流域树轮-气候响应研究表明[27],海西沟树轮宽度标准化年表的年轮指数序列与上年 8 月至当年 7 月的降水量相关最好,上年 8 月至当年 7 月的降水可能是该地区树木径向生长的主要限制性因子并具有明显的树木生理学意义。很多研究均表明,在天山山区,雪岭云杉树木径向生长的主要限制性因子为生长季前期和生长季的水分[13-16]。因此,将距离采样点最近的温泉气象站 1959—2010 年的月降水资料与海西沟(HXG)标准化年表序列进行逐步回归分析,最终得到转换函数:

$$P_{L8-7} = 8.9 + 226.0 \times \mathrm{HXG} \tag{1}$$

式中,P_{L8-7}为赛里木湖流域上年 8 月到当年 7 月的降水量重建值,HXG 为海西沟标准化年表序列。式(1)转换函数的相关系数是 0.631,方差解释量为 39.8%,调整自由度后的解释方差 $R^2_{adj}=0.385$,$F_{1,48}=31.68$,超过 0.0001的极显著水平,由该方程可以重建出 1637—2009 年赛里木流域上年 8 月到当年 7 月的降水量(图 4)。

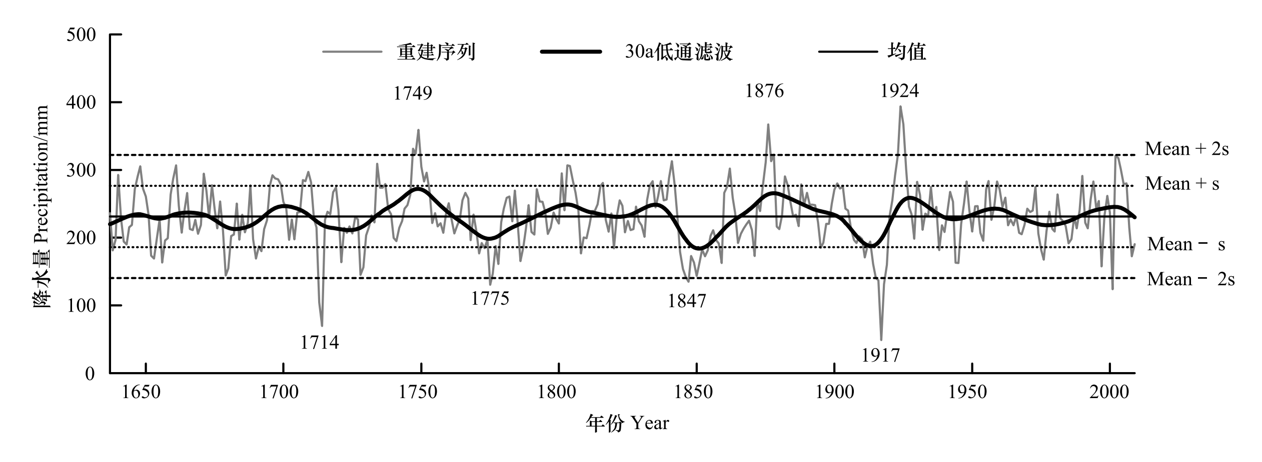


图 4　赛里木湖流域降水重建序列

Fig.4　Reconstructed precipitation series in the Sayram Lake Basin

表 1 重建方程的统计检验

Table 1 Statistical crossing-test characters of the equations reconstructed

	r	r_d	z	z_d	t	RE
降水量 Precipitation	0.632 **	0.656 **	14/50 **	12/49 **	5.139 **	0.399

* * 代表通过了 99%的显著性检验

方程检验值如表 1,交叉检验值和气象资料实测值的相关(r)为 0.632,与重建值和气象资料实测值相关及其接近,一阶差相关(r_d)也很高,达到了 0.656,符号检验(z)和一阶差符号检验(z_d)均超过了 0.01 的显著性水平,乘积平均数(t)也远远超过了 0.01 的显著性水平,误差缩减值(RE)也达到 0.399。重建值和实测值有较好的一致性(图 5),同时,重建序列与实测序列的一阶差相关系数也达到了 0.648(图 5),表明重建序列与实测序列在高频变化上一致性更好,这些均表明,重建方程是稳定可靠的。因此,利用该方程可较好的重建赛里木湖过去 373 年的降水量。

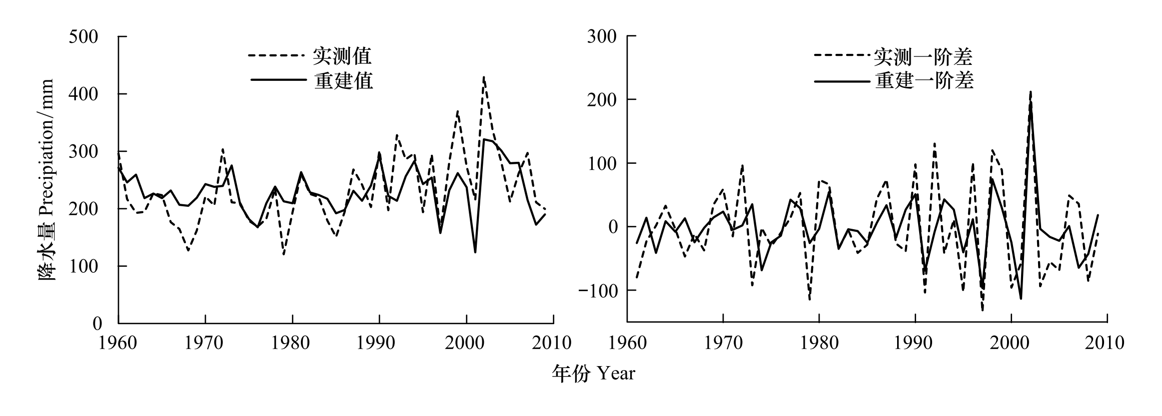


图 5 重建序列与实测序列的对比

Fig.5 Comparison of the reconstructed precipitation and the observed meteorological data

2.2 赛里木湖流域过去 373 年的降水变化分析

将重建的降水序列进行 30a 低通滤波,以了解赛里木湖流域过去 373 年的降水的低频变化趋势。分析表明,1644 —2008 年间,该地区经历了 6 干 7 湿的变化阶段(表 2)。其中,持续最长的干旱阶段为 1762—1791 年(30a),而最为干旱的阶段为 1841—1865 年,该时段平均偏干 11.6%;持续最长的湿润阶段为 1794—1840 年,持续时间长达 49 年,而最为湿润的阶段为 1734—1761 年间,平均偏湿 9.7%。1644—2008 年间,赛里木湖流域降水偏多年份明显对于干旱年份。为了提取过去 373 年赛里木流域极端干旱和湿润事件,本研究年降水量介于均值和 1 倍标准差之间的年份定义为偏涝(旱)年,将介于 1 倍标准差和 2 倍标准差之间的年份定义为湿润(干旱)年,将年降水量大于 2 倍标准差的年份定义为极端湿润(干旱)年。分析表明,过去 373 年赛里木流域存在 3 个极端湿润年(1749,1876,1924 年)和 4 个极端干旱年(1714,1775,1847 和 1917 年)。年代际降水变化分析表明:1910 年代为最干旱的 10a,1850 年代和 1770 年代也较为干旱。百年尺度降水变化分析表明,19 世纪降水量要多于 18 世纪和 20 世纪。Zhang 等[15-16]分析中亚西天山过去降水变化研究表明,1917 年是过去百年中最为干旱的 1a,而 1910 年代是最为干旱的十年。尤其是 1917—1918 年的严重干旱,在天山山区历史气候变化研究中普遍存在,甚至在同处干旱区的蒙古国也存在 1917 年的干旱[32]。同时,新疆的历史文献也清楚的记录 1917 年的大旱[33]。魏文寿等[20]基于天山山区主要地区的树轮年表重建的天山山区过去 235 年的降水变化研究结果表明:1770—1777 年天山山区整体偏干,而 1843—1865 年天山山区经历了长达 23a 的干旱时期。而高卫东等[25]基于大量树轮年表揭示的天山北坡中部过去 338 年降水变化事实也表明:1768—1777 年和 1853—1869 年为较为干旱的时期。这些结果与本文的 1770 年代和 1850 年代较为干旱的结果一致。

表 2　赛里木湖流域 1644—2008 年降水变化阶段对比

Table 2　Comparison of wet and dry stages over the past hundred years

降水偏少阶段 Drought period	持续时间/a Duration	偏干程度/% Anomaly percentage	降水偏多阶段 Pluvial period	持续时间/a Duration	偏湿程度/% Anomaly percentage
			1644—1672	29	0.9
1673—1692	20	5.1	1693—1709	17	4.4
1710—1733	24	5.9	1734—1761	28	9.7
1762—1791	30	7.6	1792—1840	49	3.7
1841—1865	25	11.6	1866—1901	36	7.6
1902—1921	20	11.1	1922—1966	45	3.8
1967—1988	22	3.6	1989—2008	20	3.9
	141			224	

多窗谱分析[29-31]揭示了赛里木湖流域过去 373a 降水变化存在 99% 显著性水平上存在 11—12a、3.0a、2.5a、2.1a 和 2.0a 的变化准周期(图 6)。2a 左右的变化准周期特征与"准两年脉动(QBO)"十分接近,已有研究表明,QBO 的影响存在于较大的范围,其可能与海气间相互耦合振荡有关[34]。有研究表明,北极涛动指数(AOI)具有 2—4a 周期,西北地区降水变化与 AO 之间的显著相关主要表现在准 3a 尺度共振周期上[35]。罗哲贤等系统地研究了西北干旱气候,发现西北地区的降水量演变规律存在为准 3a 周期[36]。事实上在受西风影响的我国西北地区很多区域,降水都存在 2—3a 和 11a 左右的变化准周期,如天山山区[13-25]和祁连山北坡河西走廊地区[37-39]。其中 11a 的周期与太阳黑子活动的 Schwabe(11a)[40]吻合。另外,将重建序列与北大西洋涛动指数(NAOI)[41]相关分析表明,赛里木湖流域降水变化受夏季 NAO 影响,降水重建序列和 7 月的 NAO 指数在 1899—2009 年间相关系数达 0.210(P<0.05)。中亚西天山过去百年干湿变化研究也表明,西天山降水变化可能受 NAO/AO 控制[15]。这些结果表明,赛里木湖过去 373a 降水变化可能受到太阳活动和北大西洋涛动、北极涛动等较大尺度的气候系统影响。

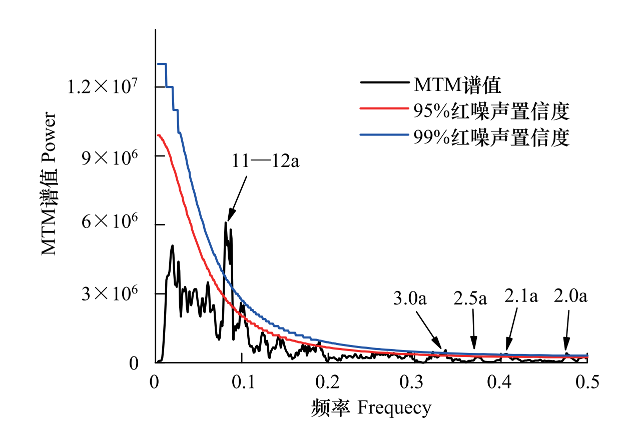


图 6　重建序列的多窗谱分析

Fig.6　Multi-taper power spectra for the reconstructed precipitation

将降水变化阶段与其它天山北坡中西部基于雪岭云杉重建的历史降水变化阶段进行对比分析表明,天山北坡中西部历史干湿变化具有很好的一致性(图 7)。将重建的降水序列与较大范围 CRU 上年 8 月到当年 7 月降水资料空间相关分析表明(图 8),重建的降水序列能较好的代表天山北坡中西部和中亚大部分区域上年 8 月到当年 7 月的降水量,尤其是西天山北坡。

3　结论

(1)利用天山西部赛里木湖流域的树木年轮标准化宽度年表可较好的重建该区域过去 373 年的降水变化。

(2)赛里木湖流域过去 373 年的降水经历了 6 干 7 湿的阶段变化,其中,持续最长的干旱阶段为 1762—1791 年,而最为干旱的阶段为 1841—1865 年;持续最长的湿润阶段为 1794—1840 年,而最为湿润的阶段为 1734—1761 年间;赛里木流域历史降水存在 3 个极端湿润年(1749,1876 和 1924 年)和 4 个极端干旱年(1714,1775,1847 和 1917 年),1910 年代为最干旱的 10a;降水变化存在 11—12a、3.0a、2.5a、2.1a 和 2.0a 的变化准周期。

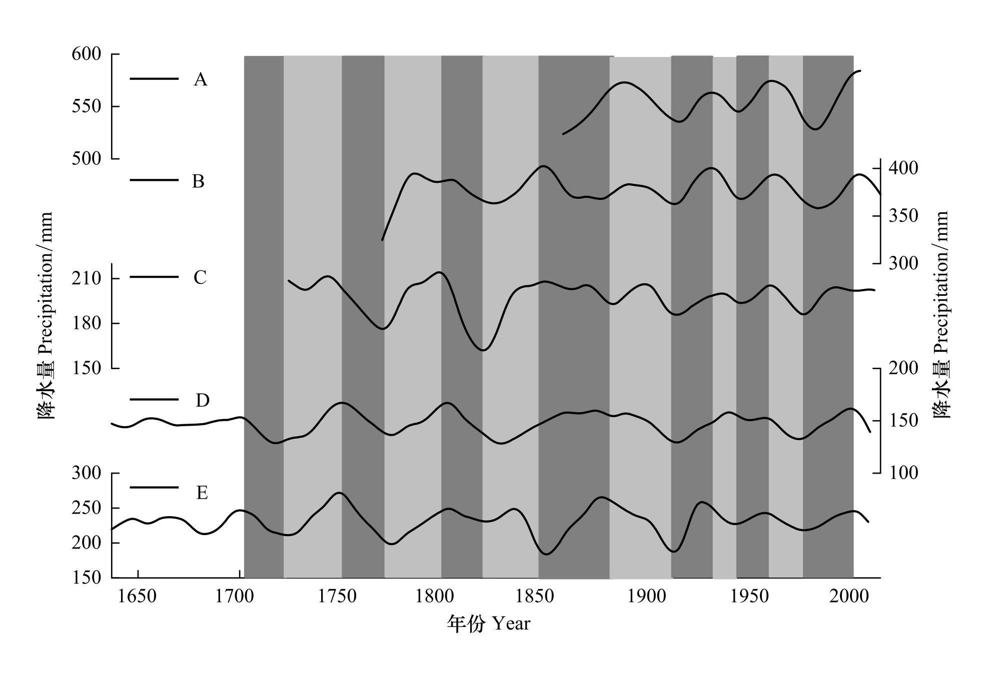


图 7 天山北坡中西部过去 300 年降水变化

Fig.7 Change of wet and dry over the past hundred years on different areas in the Tianshan Mountains

A：中天山巩乃斯河源区上年 7 月到当年 6 月降水量重建序列[23]；B：西天山北坡哈萨克斯坦南部上年 6 月到当年 5 月的降水量重建序列[16]；C：天山中部北坡玛纳斯河流域上年 7 月到当年 6 月的降水量重建序列；D：天山北坡博州中东部上年 7 月到当年 6 月的降水量重建序列[42]；E：本研究重建的赛里木湖流域降水重建序列

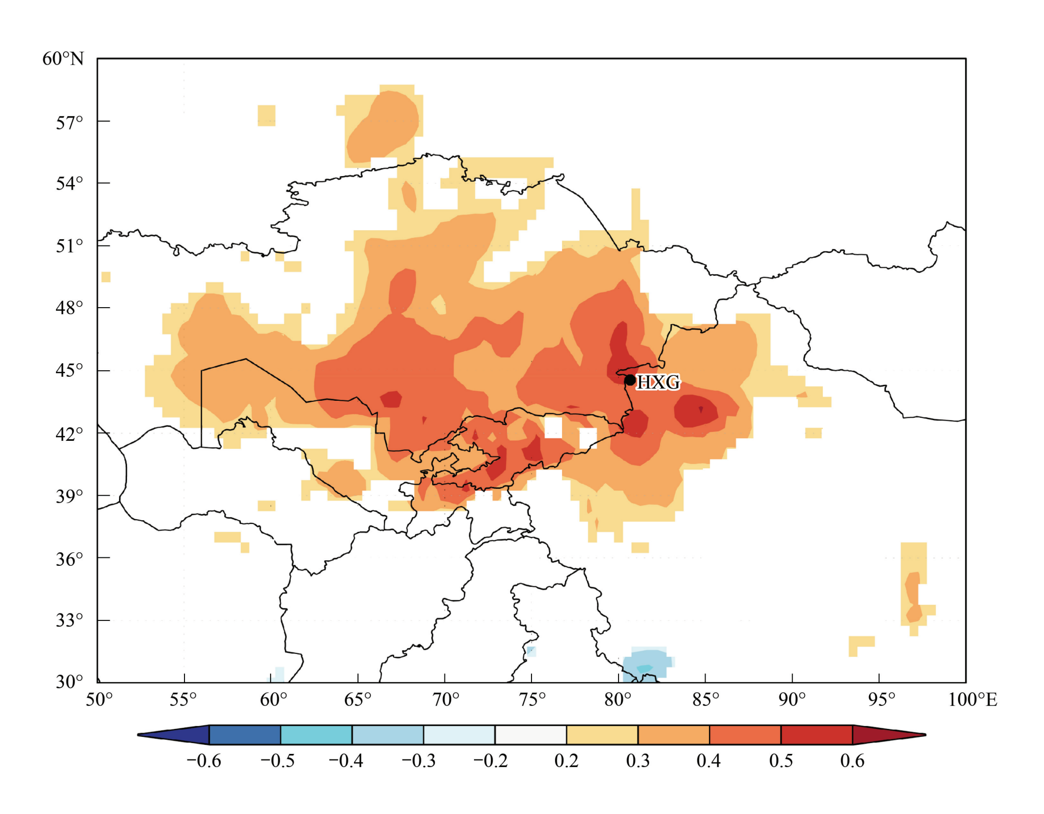


图 8 赛里木湖降水重建序列与 CRU 上年 8 月到当年 7 月降水量的空间相关（1960—2009, $P<10\%$）

Fig.8 Spatial correlation of precipitation between reconstructed series and CRU（1960—2009, $P<10\%$）

（3）赛里木湖流域过去 373 年的降水的阶段变化、周期变化和极端降水年份均与天山北坡中西部和中亚天山山区降水变化具有很好的一致性，本研究的降水重建序列能较好的代表天山北坡中西部和中亚大部分区

域历史降水变化。

参考文献(References):

[1] IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press, 1-1535.

[2] Dai A G, Trenberth K E, Karl T R. Global variations in droughts and wet spells: 1900—1995. Geophysical Research Letters, 1998, 25(17): 3367-3370.

[3] Huang J P, Yu H P, Guan X D, Wang G Y, Guo R X. Accelerated dryland expansion under climate change. Nature Climate Change, 2015, 6(2):166-171.

[4] IPCC: Climate change 2007: The physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.

[5] Cheng H, Zhang P Z, Spötl C, Edwards R L, Cai Y J, Zhang D Z, Sang W C, Tan M, An Z S. The climatic cyclicity in semiarid-arid central Asia over the past 500 000 years. Geophysical Research Letters 2012, 39(1), L01705.

[6] Shi Y F, Shen Y P, Kang E S, Li D L, Ding Y J, Zhang G W, Hu R J. Recent and future climate change in Northwest China. Climatic Change, 2007, 80(3-4): 379-393.

[7] Briffa K R, Osborn T J, Schweingruber F H, Harris L C, Jones P D, Shiyatov S G, Vaganov E A. Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D3), 2929-2941.

[8] Büntgen U, Tegel W, Nicolussi K, McCormick M, Frank D, Trouet V, Kaplan J O, Herzig F, Heussner K U, Wanner H, Luterbacher J, Esper J. 2500 years of European climate variability and human susceptibility. Science 2011, 331(6017): 578-582.

[9] Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, D'Arrigo R D, Jacoby G C, Wright W E. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. Science, 2010, 328(5977): 486-489.

[10] Shao X M, Xu Y, Yin Z Y, Liang E Y, Zhu H F, Wang S. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. Quaternary Science Reviews, 2010, 29(17-18): 2111-2122.

[11] Pederson N, Hessl A E, Baatarbileg N, Anchukaitis K J, Cosmo N D. Pluvials, droughts, the Mongol Empire, and modern Mongolia. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2014, 111(12): 4375-4379.

[12] Yang B, Qin C, Huang K, Fan Z X, Liu J J. Spatial and temporal patterns of variations in tree growth over the northeastern Tibetan Plateau during the period AD 1450-2001. The Holocene, 2010, 20(8):1235-1245.

[13] Yuan Y J, Li J F, Zhang J B. 348 year precipitation reconstruction from tree-rings for the North Slope of the middle Tianshan Mountains. Acta Meteorologica Sinica, 2001, 15(1):95-104.

[14] Yuan Y J, Jin L Y, Shao X M, He Q, Li Z Z, Li J F. Variations of the spring precipitation day numbers reconstructed from tree rings in the Urumqi River drainage, Tianshan Mts. over the last 370 years. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14): 1507-1510.

[15] Zhang R B, Yuan Y J, Gou X H, He Q, Shang H M, Zhang T W, Chen F, Ermenbaev B, Yu S L, Qin L, Fan Z A. Tree-ring-based moisture variability in western Tianshan Mountains since A.D. 1882 and its possible driving mechanism[J]. Agricultural and Forest Meteorology 2016, 218-219: 267-276.

[16] Zhang R B, Shang H M, YU S L, He Q, Yuan Y J, Bolatov K, Mambetov B T. Tree-ring-based precipitation reconstruction in southern Kazakhstan, reveals drought variability since A.D. 1770. International Journal of Climatology 2016, doi: 10.1002/joc.4736.

[17] Zhang T W Zhang R B, Yuan Y J, Gao Y Q, Wei W S, Diushen M, He Q, Shang H M, Wang J. Reconstructed precipitation on a centennial timescale from tree rings in the western Tien Shan Mountains, Central Asia. Quaternary International, 2015, 358: 58-67.

[18] 袁玉江, 邵雪梅, 李江风, 李新建,唐凤兰. 夏干萨特树轮年表中降水信息的探讨与 326 年降水重建. 生态学报. 2002,22(12): 2048-2053.

[19] Zhang T W, Yuan Y J, Liu Y, Wei W S, Yu S L, Chen F, Fan Z A, Shang H M, Zhang R B, Qin L. A tree ring based precipitation reconstruction for the Baluntai region on the southern slope of the central Tien Shan Mountains, China, since A.D.1464. Quaternary International, 2013, 283: 55-62.

[20] 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙,张瑞波.中国天山山区 235a 气候变化及降水趋势预测[J].中国沙漠, 2008, 28(5): 803-808.

[21] 喻树龙, 袁玉江, 金海龙, 崔宇,刘斌, 林春亮. 用树木年轮重建天山北坡中西部 7-8 月 379a 的降水量. 冰川冻土, 2005, 27(3): 404-410.

[22] 张瑞波, 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 杨青. 1396-2005 年天山南坡阿克苏河流域降水序列重建与分析. 冰川冻土, 2009, 31(1): 27-33.

[23] 尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 陈霞, 张同文, 刘新华. 树轮记录的中天山 150 年降水变化特征. 干旱区研究, 2010, 27(3):

443-449.

[24] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 喻树龙, 范子昂, 张瑞波, 张同文, 尚华明. 特克斯河流域近236a降水变化及其趋势预测. 山地学报, 2010, 28(5): 545-551.

[25] 高卫东, 袁玉江, 张瑞波, 刘志辉. 树木年轮记录的天山北坡中部过去338a降水变化. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1535-1539.

[26] Aizen E M, Aizen V B, Melack J M, Nakamura T, Ohta T. Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia. International Journal of Climatology, 2001,21(5):535-556.

[27] 秦莉, 袁玉江, 喻树龙, 范子昂, 尚华明, 陈峰, 张同文. 赛里木湖流域雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)树木径向生长对气候变化的响应. 中国沙漠, 2015,35(1): 113-119.

[28] 张小龙. 新疆温泉县气温、降水及径流变化特征. 水利科技与经济, 2011,17(5):66-67.

[29] Cook E R, Kairiukstis L A. Methods of dendrochronology. The Netherlands, Springer, 1990, 1-200.

[30] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京:气象出版社, 1990:1-171.

[31] Biondi F, Waikul K. Dendroclim2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. Computer & Geosciences,2004, 30(3): 303-311.

[32] Pederson N, Jacoby G C, D'Arrigo R D, Cook E R, Buckley B M, Dugarjav C, Mijiddorj R. Hydrometeorological reconstructions for northeasternMongolia derived from tree rings: 1651-1995. Journal of Climate, 2001, 14(5): 872-881.

[33] 史玉光. 中国气象灾害大典: 新疆卷. 北京: 气象出版社, 2006:1- 9.

[34] Mann M E, Lee J M. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. Climatic Change 1996,33(3):409-445.

[35] 郭渠, 孙卫国, 程炳岩, 邓爱娟. 我国西北地区气候变化与北极涛动的交叉小波分析.南京气象学院院报, 2008,31(6):811-818

[36] 罗哲贤. 中国西北干旱气候动力学引论. 北京: 气象出版社, 2005:130-170.

[37] Chen F, Yuan Y J, Wei W S, Zhang R B, Yu S L, Shang H M, Zhang T W, Qin L, Wang H Q, Chen F H. Tree-ring-based annual precipitation reconstruction for the Hexi Corridor, NW China: consequences for climate history on and beyond the mid-latitude Asian continent. Boreas, 2013, 42(4): 1008-1021.

[38] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 喻树龙, 张瑞波, 范子昂, 张同文, 尚华明, 李杨. 腾格里沙漠南缘近315年5-6月PDSI指数变化. 地理科学, 2011,31(4):434-439.

[39] Chen F, Yuan Y J, Wei W S, Yu S L, Fan Z A, Zhang R B, Zhang T W, Shang H M. Tree-Ring-Based Reconstruction of Precipitation in the Changling Mountains, China, since A.D.1691. International Journal of Biometeorology, 2012, 56(4): 765-774.

[40] Wilson R C, Hudson H S. Solar luminosity variations in solar cycle 21. Nature, l988, 332(6167): 8l0-812.

[41] Li J P, Wang J X L. A new North Atlantic Oscillation index and its variability. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(5): 661-676.

[42] 蔺甲, 袁玉江, 魏文寿, 张同文, 喻树龙. 利用树轮年表重建新疆博州中东部1622-2010年降水量. 中国沙漠,2013,33(5):1527-1535.